

# The Effect of the Mortar Viscosity on the Surface Properties of Self-Compacting Fair-Faced Concrete

Hongli Yu<sup>1\*</sup>, Jia Qin<sup>1</sup>, Detong Wu<sup>2</sup>, Honggen Qin<sup>2</sup>, Chaoming Pang<sup>2#</sup>

<sup>1</sup>CCCC First Highway Engineering Co. Ltd. Second Engineering Co., Ltd., Suzhou Jiangsu

<sup>2</sup>School of Material Science and Engineering, Southeast University; Jiangsu Key Laboratory of Civil Engineering Materials, Nanjing Jiangsu

Email: 460184919@qq.com, #pangchao@seu.edu.cn

Received: Jan. 11<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jan. 23<sup>rd</sup>, 2018; published: Jan. 30<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

This paper studies the mortar plastic viscosity and the surface properties of self-compacting fair-faced concrete, and the software Image-Pro Plus is used to quantitatively analyze the surface properties. The mortar rheological properties are described by applying Bingham fluid. The results indicate that the viscosity properties of mortar in the self-compacting fair-faced concrete are in line with the rheological equation of Bingham fluid, which shows that the mortar plastic viscosity is a significant factor for the surface properties of self-compacting concrete, but the correlation between surface properties and the yield shear stress or the flow velocity is low. The increase of water content or adding air entraining agent, can reduce the plastic viscosity and shear yield stress, but the equal volume replacement of river sand with light sand can only reduce the plastic viscosity, but the yield shear stress will increase. With the increase of plastic viscosity, the percentage of surface pore areas gradually increases, the pore size distribution becomes wider, and the number of pore with the diameter more than 2 mm increases; furthermore, the diameter of the biggest pore becomes larger. The self-compacting concrete with the plastic viscosity less than 9.37 Pa·s has a better fair-faced surface. In this condition, the percentage of the surface pore areas is less than 0.2%, and the diameter of the biggest pore is less than 5 mm.

## Keywords

Plastic Viscosity, Self-Compacting, Fair-Faced, Surface Properties, Images

---

\*第一作者。

#通讯作者。

# 砂浆塑性粘度对自密实清水混凝土表面性能的影响

尉洪利<sup>1\*</sup>, 秦佳<sup>1</sup>, 吴德通<sup>2</sup>, 秦鸿根<sup>2</sup>, 庞超明<sup>2#</sup>

<sup>1</sup>中交一公局第二工程有限公司, 江苏 苏州

<sup>2</sup>东南大学材料科学与工程学院, 江苏省土木工程材料重点实验室, 江苏 南京

Email: 460184919@qq.com, #pangchao@seu.edu.cn

收稿日期: 2018年1月11日; 录用日期: 2018年1月23日; 发布日期: 2018年1月30日

## 摘要

本文研究了自密实清水混凝土的砂浆流变性能和表面性能, 采用Image-Pro Plus软件进行了表面图像的定量分析, 并分析了表面性能与流变性的相关性。结果表明, 自密实混凝土中的砂浆流变性能符合宾汉姆体的流变方程, 砂浆塑性粘度是影响自密实混凝土表面性能的重要因素, 而与屈服剪切应力的相关性较低, 与宏观工作性的表征指标流动速度和扩展度的相关性也不明显。增加用水量或掺加引气剂, 均可降低塑性粘度和屈服剪切应力, 但采用轻砂等体积替代黄砂只能降低塑性粘度, 但屈服剪切应力提高。随着塑性粘度的增大, 自密实混凝土表面气孔面积百分数逐渐增大, 孔洞尺寸分布变宽, 直径大于2 mm气孔增多且孔径变大。塑性粘度低于9.37 Pa·s的自密实混凝土表面清水效果较好, 表面气孔面积小于0.2%, 最大孔径小于5 mm。

## 关键词

塑性粘度, 自密实, 清水, 表面性能, 图像

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

自密实清水混凝土既有自密实混凝土的特点, 即一种在没有任何振捣措施条件下, 依靠自身重力产生流动性和达到密实作用的混凝土; 又具有清水混凝土的表面装饰效果[1]。自密实清水混凝土具有提高混凝土质量、加快施工进度、改善施工环境、保护环境和节约资源的优点, 因此其研究和应用价值极高。自密实清水混凝土理论上虽然兼具自密实和清水的优点, 但是自密实混凝土具有大流动性(SF: 550~850 mm), 浆体的胶凝材料用量大(400~550 kg/m<sup>3</sup>), 为了防止离析泌水, 必然要求浆体具有大的粘度, 导致富集在混凝土表面的气泡难以排出[2]。合理的粘度范围不仅可以提高自密实混凝土的流变性能, 而且能够改善清水混凝土的表观质量[3] [4]。

自密实混凝土可以看成是由粗骨料和砂浆组成的, 而且自密实混凝土的流动性很大程度上受到砂浆性能的影响[5] [6]。许多研究表明自密实混凝土中砂浆和自密实混凝土的流变性能存在很强的相关性,

而且测试砂浆的流变性能比混凝土经济、高效[7] [8] [9] [10]。本研究将通过测试自密实混凝土中砂浆的塑性粘度, 观察不同塑性粘度的砂浆对自密实混凝土的表现性能的影响。

## 2. 原材料与试验

### 2.1. 原材料

试验原材料采用海螺 P·II 52.5 水泥(代号 C), 比表面积  $354 \text{ m}^2/\text{kg}$ , 3 d 和 28 d 抗压强度分别为 31.0 MPa, 57.6 MPa; I 级粉煤灰(代号 FA), 密度为  $2160 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 比表面积  $445 \text{ m}^2/\text{kg}$ , 需水量比为 95%, 28 d 活性指数 72.3%; S95 矿渣粉(代号 SL), 密度为  $2900 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 比表面积  $434 \text{ m}^2/\text{kg}$ , 流动度比为 102%, 28 d 活性指数分别为 113%; 细集料采用细度模数为 2.6 的河砂(代号 S), 表观密度为  $2630 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 空隙率 41.5%, 泥含量 0.8%, 泥块含量 0.4%; 粗集料采用 5~20 mm 连续级配的碎石(代号 G), 表观密度为  $2640 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 空隙率 45.0%, 泥含量 0.6%, 泥块含量 0.4%; 固体内养护辅料(代号 Z)采用免烧轻砂, 粒径为 1~4 mm, 饱和面干吸水率为 30%; 外加剂(代号 A)采用聚羧酸系高性能减水剂 JM-PCA, 固含量 30%, 减水率为 35%, 引气剂(代号 AEA)和纤维素类增稠剂(代号 VMA); 水为自来水(代号 W)。

### 2.2. 试验

#### 2.2.1. 粘度测试

试验采用 Brookfield RST 旋转粘度计表征砂浆粘度。试验设置了 10 个不同的转速, 分别由低速逐渐上升到高速, 如表 1。水泥基复合材料是一种多相混合物, 很多学者采用宾汉流体描述其流变性能[11] [12] [13] [14]。在宾汉流体中, 当剪切应力  $\tau$  大于屈服应力  $\tau_0$  时, 浆体才能发生流动, 具有塑性流体的性质; 当剪切应力  $\tau$  小于屈服应力  $\tau_0$  时, 浆体没有流动性, 表现为固体, 其流变方程为:

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (1)$$

式中,  $\tau$  为剪切应力(Pa);  $\tau_0$  为屈服应力(Pa);  $\mu$  为塑性粘度(Pa·s);  $\dot{\gamma}$  为剪切速率( $\text{S}^{-1}$ )。屈服应力  $\tau_0$  由浆体内各颗粒之间的附着力和摩擦力产生, 是阻止浆体塑性变形的最大应力。塑性粘度  $\mu$  则是浆体内部结构阻碍流动的一种性能, 反应了浆体体系的变形速率。回归拟合剪切应力和剪切速率, 可得出浆体的塑性粘度。

#### 2.2.2. 自密实清水混凝土试件的制备

自密实清水混凝土表面性能所用模具尺寸为  $300 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ , 采用表 1 的配合比制备混凝土混合料, 一次性自流平浇注成型, 用木锤在模具的侧面各均匀敲击 25 次, 养护 24 h 后脱模, 分别观察混凝土表面性能。

## 3. 试验结果与分析

### 3.1. 自密实清水混凝土试验配合比

试验设计了 10 组具有不同砂浆塑性粘度的 C60 自密实清水混凝土, 粉煤灰和矿渣微粉双掺, 固定粉煤灰掺量为 20%, 固定矿渣掺量为 20%, 固定砂率为 48%, 其中 P4 组采用 35 kg 轻集料等体积替代砂作为内养护辅料。变化水胶比在 0.28~0.33, 变化外加剂掺量, 并通过引气剂和增稠剂改变砂浆的粘聚性, 以研究用水量、外加剂、内养护辅料、引气剂和增稠剂等对砂浆的粘聚性的影响。测试了自密实混凝土的流动性  $T_{500}$  和扩展度, 其中  $T_{500}$  为混凝土流动度到 500 mm 所需的时间。混凝土配合比参数及其流动性测试结果列于表 2 中。其中 P1 组出现了轻微的泌水情况。

**Table 1.** Testing procedure of rheological properties  
**表 1.** 流变性能的测试程序

Time (s)	27	55	82	110	137	164	192	219	246	274
Shear rate (1/s)	0.164	0.283	0.706	1.650	2.356	4.719	11.793	23.624	28.357	35.369

**Table 2.** Mix proportion and fluidity of self-compacting concrete  
**表 2.** C60 自密实混凝土试验配合比及其流动性

Group	W/B	A (%)	W	S	Z	A	AEA (‰)	VMA (‰)	T <sub>500</sub> (S)	Slump flowing diameter (mm)
P1	0.30	1.20	159	821	/	6.36	/	/	15	630
P2	0.33	1.00	170	821	/	5.19	/	/	2	710
P3	0.30	1.00	159	821	/	5.30	0.2	/	9	700
P4	0.30	1.00	159	741	35	5.30	/	/	8	690
P5	0.32	1.10	165	821	/	5.76	/	/	6	655
P6	0.30	1.00	159	821	/	5.30	/	/	13	660
P7	0.30	1.20	159	821	/	6.36	/	/	10	720
P8	0.30	1.10	159	821	/	5.83	/	0.3	9	635
P9	0.28	1.20	150	821	/	6.47	/	/	15	610
P10	0.30	1.20	159	821	/	6.36	/	0.5	16	530

### 3.2. 砂浆的流变性能

自密实清水混凝土制备后, 筛出其砂浆, 测试新拌混凝土中的砂浆流变性能, 并对得到的剪切应力和剪切速率作线性回归拟合, 试验结果列于表 3 中。

结果表明, 自密实清水混凝土中的砂浆流变性能符合宾汉流体的流变方程, 其剪切应力与剪切速率呈线性关系, 相关性系数  $R^2$  在 0.943~0.994 间。各组自密实清水混凝土中砂浆的塑性粘度, 其范围为 5~22 Pa·s, 屈服剪切应力变化范围较大, 在 0~95.5 Pa 之间。其中 P1~P3 组的塑性粘度  $\mu$  和屈服剪切应力  $\tau_0$  均较低,  $\tau_0$  在 5.2~7.5 之间,  $\tau_0$  低于 7.10 Pa。根据流变理论, P1~P3 易于流动, 易于实现自密实, 但 P1 组因为出现轻微泌水, 使得 T50 流动速度反而变慢, 扩展度不高。P4~P8 的塑性粘度  $\mu$  和屈服剪切应力  $\tau_0$  适中,  $\mu$  在 8.3~14.2 Pa·s 之间,  $\tau_0$  处于 12.9~64.6 Pa 之间, 塑性粘度不大, 易于自流动, 但是需要给予初始的振动应力。而 P9~P10 的塑性粘度  $\mu$  和屈服剪切应力  $\tau_0$  较高,  $\mu$  在为 20.5 Pa·s 以上,  $\tau_0$  在 93.2 Pa 以上。

分析可以看出, P1, P8 和 P6 配合比完全相同, 但 P1 外加剂掺量过高, 为 1.2%, 导致泌水, 使测得的塑性粘度  $\mu$  和屈服剪切应力  $\tau_0$  偏低,  $\tau_0$  甚至出现小于 0。出现泌水后, 适当增加增稠剂调整粘聚性的 P7 组, 其扩展度反而增大。P8 掺量为 1.1% 较 P6 高, 但粘度和屈服剪切应力均有所提高, 扩展度变化不大, 说明外加剂中含有少量的增稠组分。需要增加外加剂的同时增加用水量才能确保流动性, 如 P5 组。也可采用增稠剂调整粘聚性来提高宏观流动性 P7 和 P10 组。而降低水胶比, 通常通过增大外加剂用量来确保工作性, 如 P9 组, 但其粘度和屈服应力的显著增大。

以 P6 为基准组, P2 增加了用水量, 增大水胶比, P3 适当增加引气剂, P4 用轻砂代替黄砂, P2, P3 组砂浆的塑性粘度和屈服剪切应力均显著降低, 表现在宏观上 T<sub>500</sub> 降低, 混凝土在自重的条件下流动速度加快, 扩展度增大。而 P4 组的球形轻砂颗粒, 其塑性粘度显著降低, 但屈服剪切应力显著提高。

**Table 3.** Mortar viscosity of self-compacting concrete  
**表 3.** C60 自密实清水混凝土中砂浆塑性粘度

Group	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Viscosity $\mu$ (Pa·s)	5.17	6.51	7.50	8.27	9.37	10.46	10.90	14.23	20.53	21.75
Shear stress $\tau_0$ (Pa)	-0.32	7.10	1.25	42.89	20.11	12.89	20.31	64.58	93.17	95.50

### 3.3. 混凝土表观性能研究

采用表 1 的配合比制备的 10 组具有不同砂浆塑性粘度的自密实清水混凝土拆模后的表面情况如图 1 所示。为了对表面性能作进一步定量分析, 采用 Image-pro plus 6.0 软件对图 3 的混凝土表面进行图像处理, 主要分为四个步骤: 图像采集→灰度处理→孔洞大小和数量分析→数值处理, 处理后的黑白图像如图 2。

Silva [15]的研究表明使用孔洞面积百分数, 孔洞尺寸分布和最大孔洞尺寸三个参数能够更加全面的描述混凝土表面的孔洞情况。各组混凝土表面孔洞面积百分数, 孔洞尺寸分布和直径大于 2 mm, 孔洞个数如图 3, 图 4。

从图 2 和图 3 可以看出, 随着混凝土中砂浆的塑性粘度的增大, 混凝土表面孔洞数量和大小总体上呈上升趋势; P1、P2 和 P3 基本看不出明显空洞, 孔洞面积百分数小于 0.2%, P4 和 P5 的大孔数量开始增加, 而到 P6~P8 混凝土表面的孔洞数量明显增多, 达到 0.3%~0.6%, 其孔径也明显增大。其中 P9 和 P10 的表面孔面积均达到了 1.0%以上。

综合粘度和表面孔洞的分析表明, 表面空洞与塑性粘度的相关性显著, 而与屈服剪切应力的相关性较低。P1~P5 组自密实清水混凝土的表面孔洞面积百分数小于 0.2%, 可认为表面清水效果较好, 此时塑性粘度为 5.2~9.4 Pa·s, 屈服剪切应力在-0.32~42.9 Pa; P6~P8 组自密实混凝土的表面孔洞面积百分数在 0.3%~0.6%; P9~P10 组自密实混凝土的表面孔洞面积百分数已经大于 0.9%。

从图 4 可以看出, P1~P7 组自密实混凝土表面孔洞直径主要分布于 0~5 mm 之间, P8~P10 组主要分布于 0~11 mm 之间。2 mm 以上直径的孔洞数量从 P1 到 P10 逐渐增多; P1~P5 组的最大孔洞直径小于 5 mm, P6~P10 组的最大孔洞直径大于 5 mm, 且随着塑性粘度的上升, 自密实混凝土表面孔洞面积百分数逐渐增大, 孔洞尺寸分布变宽, 直径大于 2 mm 孔洞个数增多且最大孔洞直径变大。

综上所述, 表面性能与流动速度和扩展度等宏观工作性的表征指标的相关性不明显, 低粘度的 P1、P2 和 P3 组表面性能最好, 表面孔洞面积仅为 0.1%, 此时塑性粘度在 5.2~7.5 Pa·S, 但出现了泌水 P1 组仍然能保证良好的表面性能。而 P4 和 P5 组的表面性能可接受, 此时表面孔洞面积在 0.1%~0.2%, 最大孔径不超过 5 mm。

## 4. 结论

本文研究了自密实清水混凝土的流变性能与表观性能, 并分析了两者的相关性, 得出了以下研究结论:

1) 自密实清水混凝土中的砂浆流变性能符合宾汉姆体的流变方程。外加剂过掺导致的泌水使测得的塑性粘度和屈服应力偏低, 屈服应力甚至出现负值, 但自密实混凝土宏观工作性的表征指标流动速度低, 扩展度小, 尽管如此仍然可以保持良好的表面性能。采用增稠剂调整粘聚性后, 可以提高宏观流动性, 但表观性能降低。

2) 增加用水量、使用引气剂均可降低的塑性粘度和屈服剪切应力, 提高自密实混凝土的流动速度和扩展度。球形的轻砂等体积替代黄砂, 可降低塑性粘度而提高屈服剪切应力, 可以增大流动速度而对扩展度影响不大。

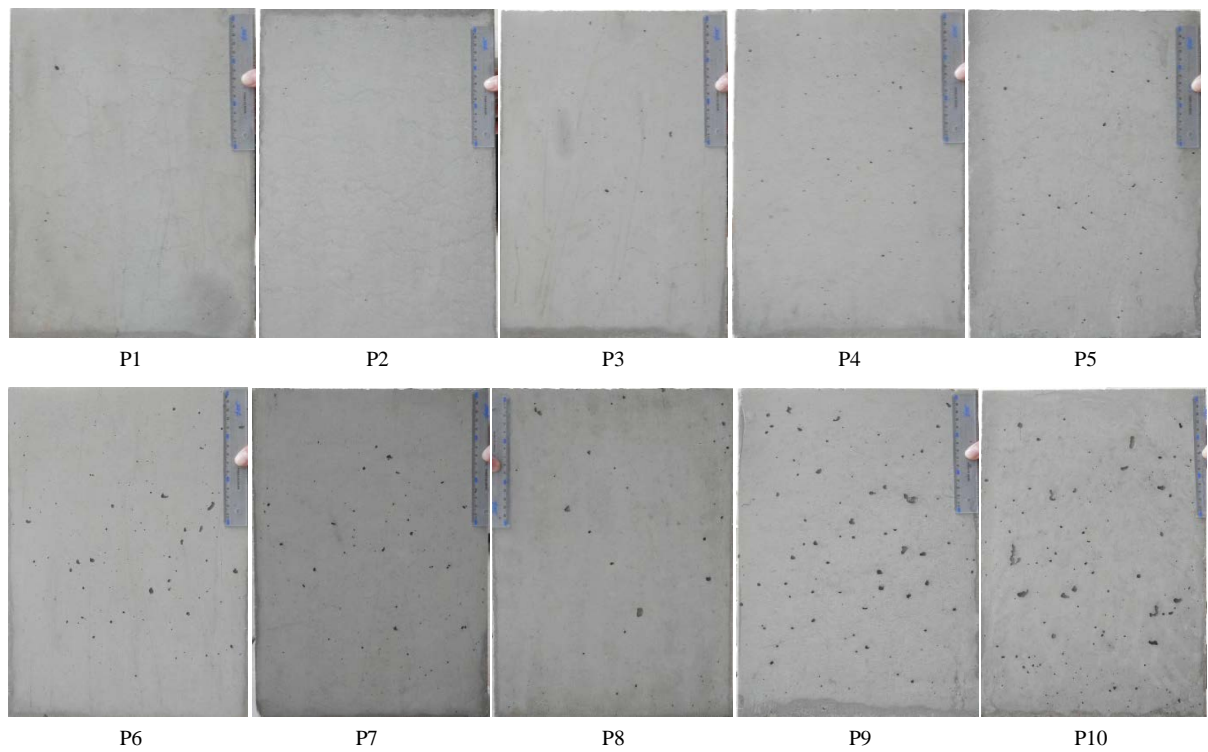


Figure 1. Surface of self-compacting concrete  
图 1. 自密实混凝土的表面

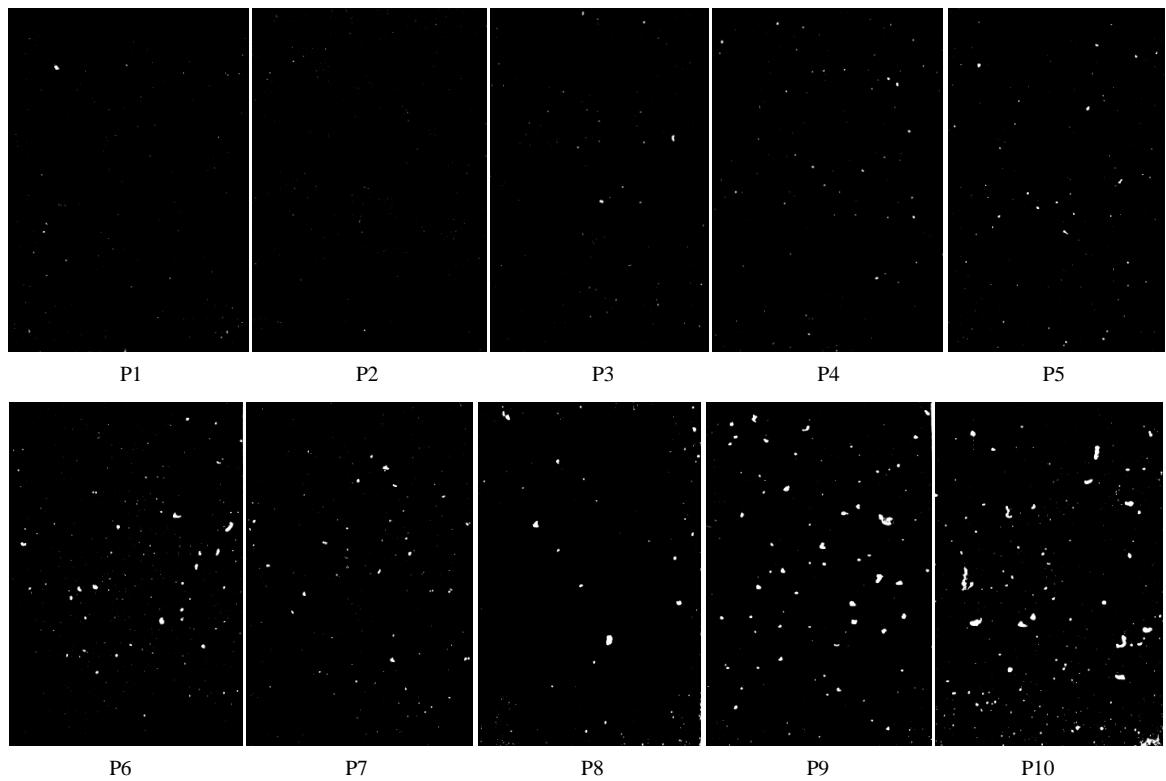


Figure 2. Surface of self-compacting concrete after image processing  
图 2. 图像处理后的自密实混凝土表面

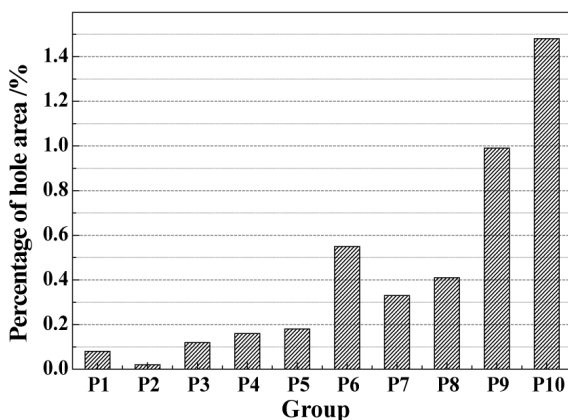


Figure 3. Percentage of hole area on the concrete surface

图 3. 混凝土表面的孔洞面积百分数

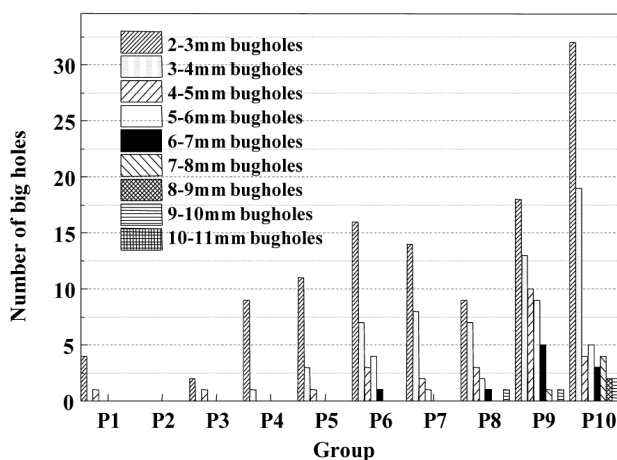


Figure 4. Number of holes greater than 2 mm on the concrete surface

图 4. 混凝土表面大于 2 mm 孔洞个数

3) 表面性能与塑性粘度的相关性显著, 而与屈服剪切应力的相关性较低, 与宏观工作性的表征指标流动速度和扩展度的相关性也不明显。随着塑性粘度的增大, 自密实混凝土表面孔洞面积百分数逐渐增大, 大孔数量增多。

4) 表面孔洞面积小于 0.2%, 最大孔洞直径小于 5 mm 时, 认为混凝土的表面清水效果可接受, 此时, 塑性粘度低于 9.4 Pa·s。其中又以表面孔洞面积小于 0.1% 更佳, 此时需控制塑性粘度低于 7.5 Pa·s。

## 基金项目

2016 江苏省级建筑产业现代化科技支撑项目; 中交一公局苏州分公司苏州过街天桥项目。

## 参考文献 (References)

- [1] 王建君. 高性能自密实清水混凝土的研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 283-2012 自密实混凝土应用技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 75.
- [3] Zerbino, R., Barragán, B., Garcia, T., et al. (2009) Workability Tests and Rheological Parameters in Self-Compacting Concrete. *Materials and Structures*, **42**, 947-960. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9434-2>

- [4] 牟廷敏, 丁庆军, 黄修林, 等. 浆体黏度对清水混凝土外观质量的影响[J]. 混凝土, 2015(2): 104-106.
- [5] EFNARC (2002) Specification and Guidelines for Self Compacting Concrete. <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>
- [6] Domone, P.L. and Jin, J. (2002) Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete. University of London, London.
- [7] Erdem, T.K., Khayat, K.H. and Yahia, A. (2009) Correlating Rheology of Self-Consolidating Concrete to Corresponding Concrete-Equivalent Mortar. *ACI Materials Journal*, **106**, 154-160.
- [8] Schwartzentruber, L.D., Roy, R.L. and Cordin, J. (2006) Rheological Behaviour of Fresh Cement Pastes Formulated from a Self Compacting Concrete (SCC). *Cement & Concrete Research*, **36**, 1203-1213. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.036>
- [9] Le, H.T., Siewert, K. and Ludwig, H.M. (2013) Rheological Behaviour of Fresh Mortar Formulated from Self-Compacting High Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash. <http://demo.webdefy.com/rilem-new/wp-content/uploads/2016/10/f4a5331408bb1db65b900b49c322bf4d.pdf>
- [10] Le, H.T., Kraus, M., Siewert, K., *et al.* (2015) Effect of Macro-Mesoporous Rice Husk Ash on Rheological Properties of Mortar Formulated from Self-Compacting High Performance Concrete. *Construction & Building Materials*, **80**, 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.079>
- [11] Chidiac, S.E. and Habibbeigi, F. (2005) Modeling the Rheological Behavior of Fresh Concrete: An Elasto-Viscoplastic Finite Element Approach. *Computers & Concrete*, **2**, 97-110. <https://doi.org/10.12989/cac.2005.2.2.097>
- [12] Maadani, O., Chidiac, S.E., Razaqpur, A.G., *et al.* (2000) Controlling the Quality of Fresh Concrete—A New Approach. *Magazine of Concrete Research*, **52**, 353-363. <https://doi.org/10.1680/mac.2000.52.5.353>
- [13] Chidiac, S.E., Maadani, O., Razaqpur, A.G., *et al.* (2003) Correlation of Rheological Properties to Durability and Strength of Hardened Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **15**, 391-399. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:4\(391\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:4(391))
- [14] Roshavelov, T. (2005) Prediction of Fresh Concrete Flow Behavior Based on Analytical Model for Mixture Proportioning. *Cement & Concrete Research*, **35**, 831-835. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.019>
- [15] Silva, W.R.L.D. and Temberk, P. (2013) Expert System Applied for Classifying Self-Compacting Concrete Surface Finish. *Advances in Engineering Software*, **64**, 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.04.005>

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)